

باسم الرحمن الرحيم



دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی قزوین

بررسی کارایی روش اسمز مستقیم در حذف فلزات سنگین کروم و سرب از محلول آبی

استاد مشاور:
دکتر رضا قنبری
دکتر سلیمان صاحبی

استاد راهنما:
دکتر حمزه علی جمالی

دانشجو:
زهره نقدعلی

شهریور ۱۳۹۸

بیان مسئله و مقدمه

❑ فلزات سنگین

✓ اثرات زیان بار فلزات کروم و سرب

غلظت فلزات سنگین در خروجی صنایع بین $0/5$ تا 270000 mg/L  

حداکثر غلظت مجاز کروم و سرب (EPA)

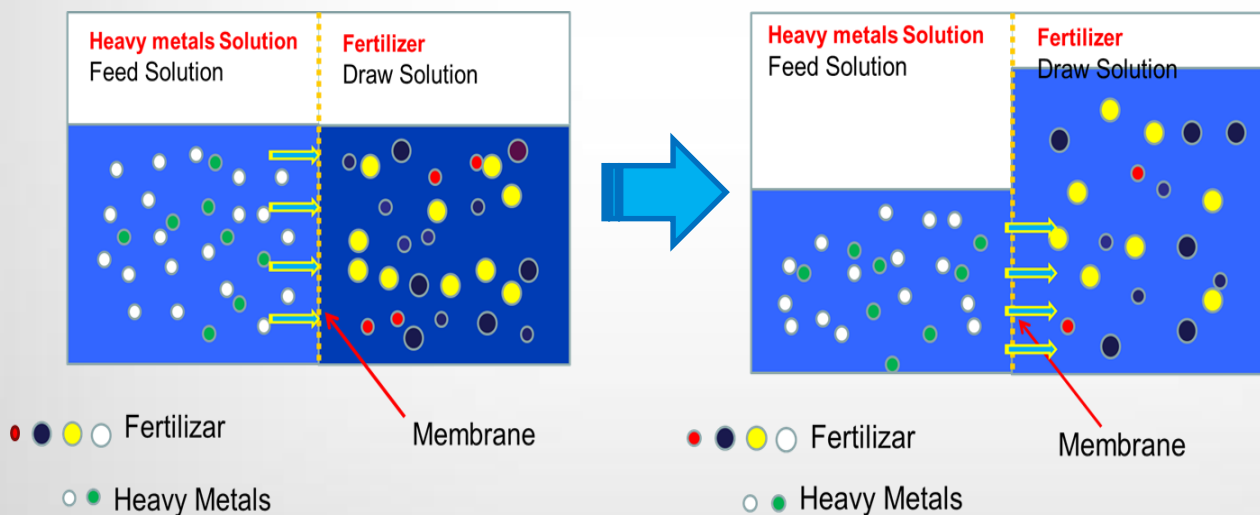
فلز (mg/L)	فاضلاب	آب های سطحی	دریا
کروم	$0/5$	$0/1$	$0/5$
سرب	1	$0/1$	$0/1$

بیان مسئله و مقدمه

اسمز مستقیم (Forward Osmosis, FO) ☐

مزایا ✓

غشاء آکوابورین ✓





اهداف پژوهش

هدف کلی:

تعیین کارایی روش اسمز مستقیم در حذف فلزات سنگین کروم و سرب از محلول آبی

اهداف اختصاصی:

- (۱) تعیین اثر نوع محلول کشنده بر میزان عبور جریان آب از غشاء
- (۲) تعیین اثر غلظت محلول کشنده بر میزان عبور جریان آب از غشاء



اهداف پژوهش

۳) تعیین اثر غلظت اولیه فلزات سنگین در محلول تغذیه بر میزان عبور جریان آب از غشاء

۴) تعیین اثر نوع محلول کشنده بر راندمان حذف فلزات سنگین از محلول آبی عبوری از غشاء

۵) تعیین اثر غلظت محلول کشنده بر راندمان حذف فلزات سنگین از محلول آبی عبوری از غشاء

۶) تعیین اثر زمان آزمایش بر میزان آب عبوری از غشاء

۷) تعیین اثر زمان آزمایش بر راندمان حذف فلزات سنگین



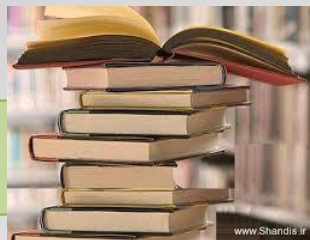
اهداف کاربردی

- (۱) به کارگیری روش اسمز مستقیم در تصفیه آب و فاضلاب های حاوی فلزات سنگین کروم و سرب
- (۲) به کارگیری روش اسمز مستقیم در تصفیه آب در شرایط اضطراری
- (۳) استفاده از آب بازیابی شده در آبیاری کشاورزی و فضای سبز به علت وجود مواد مغذی (کود شیمیایی)



سوالات پژوهشی

- (۱) آیا نوع محلول کشنده بر میزان عبور جریان آب از غشاء مؤثر است؟
- (۲) آیا غلظت محلول کشنده بر میزان عبور جریان آب از غشاء مؤثر است؟
- (۳) آیا غلظت اولیه فلزات سنگین در محلول تغذیه بر میزان عبور جریان آب از غشاء مؤثر است؟
- (۴) آیا نوع محلول کشنده بر راندمان حذف فلزات سنگین از محلول آبی عبوری از غشاء مؤثر است؟
- (۵) آیا غلظت محلول کشنده بر راندمان حذف فلزات سنگین از محلول آبی عبوری از غشاء مؤثر است؟
- (۶) آیا طول مدت آزمایش بر میزان آب عبوری از غشاء مؤثر است؟
- (۷) آیا طول مدت آزمایش بر راندمان حذف فلزات سنگین مؤثر است؟



مروری بر مطالعات و متون گذشته

محققین	سال	یافته ها
یاری و همکاران	۲۰۱۳	اثرات فاکتورهای pH، زمان تماس، نوع غشاء و محلول کشنده بر میزان حذف کروم نشان داد که در pH برابر ۹ مقدار زیادی کروم از آب حذف شد. همچنین با افزایش زمان تماس، راندمان حذف کروم کاهش یافت و آمونیوم بیکربنات (NH_4HCO_3) به عنوان محلول کشنده کارایی بهتری را در مقایسه با سدیم کلرید نشان داد.
موندال و همکاران	۲۰۱۳	در غلظت ۵۰۰ ppb از آرسنیک بیش از ۹۸ درصد حذف مشاهده شد. در pH ۳ تا ۷ آرسنیک به مقدار کم حذف شد.
یو و همکاران	۲۰۱۷	با استفاده از نوعی غشاء سنتز شده و محلول تغذیه با pH حدود ۴/۵ و محلول کشنده کلرید سدیم با غلظت ۲ M، فلاکس آب بیش از ۶۹L/m ² h به دست آمد. هنگامی که غلظت فلزات سنگین دوزفیتی ۲۰۰mg/L بود راندمان حذف به طور میانگین ۹۴ درصد به دست آمد. غلظت بالای ۶۰۰mg/L منجر به کاهش راندمان حذف به کمتر از ۹۰ درصد شد.

مواد و روش کار

✓ نوع مطالعه:

مطالعه از نوع تجربی بود که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد.

✓ جامعه و مکان پژوهش:

جامعه مورد مطالعه شامل محلول های سنتتیک کروم و سرب تهیه شده در آزمایشگاه شیمی محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین بود.

✓ طراحی آزمایش ها

- تعیین دامنه متغیرها بر اساس سایر مطالعات و آزمایشهای مقدماتی در آزمایشگاه
- نرم افزار 7 Design Expert / روش سطح پاسخ به صورت طرح مرکب مرکزی

مواد و روش کار

✓ طراحی آزمایش ها

- معادله تعیین مقدار α

$$\alpha = 2^{n/4} = 2^{3/4}$$

- تعیین تعداد آزمایش ها

۲۰ آزمایش (در ۶ سری)

در مجموع ۱۲۰ آزمایش

- مدل چند جمله ای درجه دوم


$$N = 2^K + 2K + C_p$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ii \leq i}^k \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots + e$$

متغیرها					سطوح کد بندی شده
-۱/۶۸	-۱	۰	+۱	+۱/۶۸	
۳۲/۹۶	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۱۷/۰۴	A: غلظت محلول تغذیه (mg/L)
۰/۱۶	۰/۵	۱	۱/۵	۱/۸۴	B: غلظت محلول کشنده (mol/L)
۹/۵۵	۳۰	۶۰	۹۰	۱۱۰/۴۵	C: زمان (min)

مواد و روش کار

✓ روش نمونه گیری

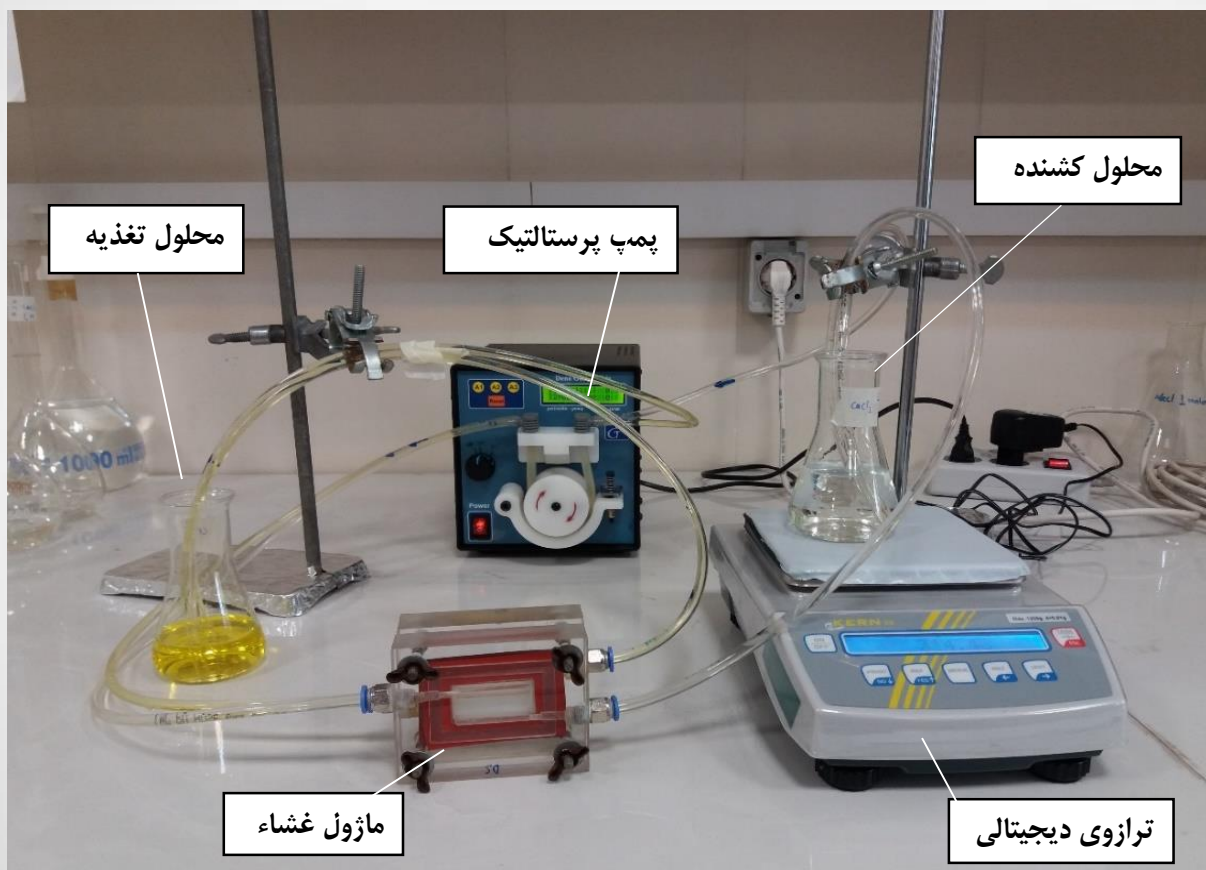
- تهیه محلول های کشنده از : نمک های پتاسیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید
 - تهیه محلول های تغذیه از : نمک های دی کرومات پتاسیم و نترات سرب
- غلظت ها بر اساس مطالعات خدابخشی و همکاران بر اساس محدوده غلظت  این فلزات در پساب خروجی از صنایع انتخاب شد.

✓ ابزار گردآوری داده ها

نمک های منیزیم کلرید شش آبه ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، کلسیم کلرید (CaCl_2) و پتاسیم کلرید (KCl)
دی کرومات پتاسیم ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) و نترات سرب ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
دستگاه هدایت سنج / غشاء آکواپورین / پمپ پرستالتیک / ترازوی دیجیتالی / دستگاه جذب اتمی

مواد و روش کار

✓ روش انجام آزمایش ها



مواد و روش کار

✓ روش اندازه گیری و سنجش متغیرهای پژوهش



مواد و روش کار

✓ روش تجزیه و تحلیل داده ها

معادلات مربوط به فرآیند FO:

$$J_w = \frac{\Delta m}{\rho A_m \Delta t} \quad (1) \text{ فلاکس آب}$$

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_P}{C_f}\right) \times 100 \quad (2) \text{ راندمان حذف فلزات}$$

$$J_s = \frac{\Delta C_t m_f}{\rho A_m \Delta t} \quad (3) \text{ جریان معکوس نمک}$$

تجزیه و تحلیل نهایی

توسط نرم افزار صورت گرفت.

مواد و روش کار

✓ بهینه سازی عددی

غلظت محلول تغذیه، غلظت محلول کشنده و زمان آزمایش ← Numerical

Maximize { فلاکس آب
حذف فلزات

و جریان معکوس نمک ← Minimize

✓ ملاحظات اخلاقی

در راستای جلوگیری از آلودگی محیط زیست، حین انجام این تحقیق، محلول های حاوی فلزات سنگین جمع آوری و در ظروف پلاستیکی نگه داری و در نهایت توسط روش انعقاد الکتریکی تصفیه و کم خطر شد.



یافته ها

ماتریس طرح مرکب
مرکزی با سه متغیر
مستقل با نتایج واقعی و
پیش بینی شده توسط
مدل درجه دوم آماری
برای آزمایش KCl-Cr

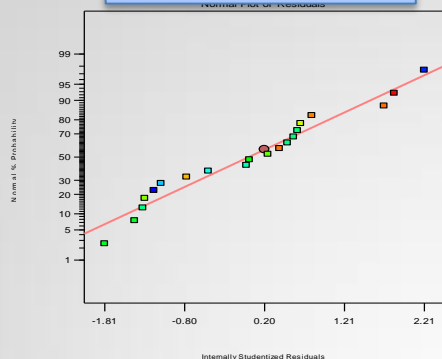
میزان RSF (gMH)		راندمان حذف کروم (%)		فلاکس جریان (LMH)		زمان (min)	محلول کشنده (mol/L)	محلول تغذیه (mg/L)	شماره آزمایش (تصادفی)	شماره آزمایش
پیش بینی شده توسط مدل	واقعی	پیش بینی شده توسط مدل	واقعی	پیش بینی شده توسط مدل	واقعی					
۴/۴	۴/۲۴	۹۸/۶۹	۹۸	۱۰/۹۹	۱۱	۳۰	۰/۵	۵۰	۱۵	۱
۷/۹۴	۸	۹۷/۷۴	۹۸/۶۳	۱/۶۸	۴	۳۰	۰/۵	۱۰۰	۱۶	۲
۱۱/۷۳	۱۱/۵	۹۰/۵	۹۰/۶۹	۱۶/۵۷	۱۸/۵	۳۰	۱/۵	۵۰	۱۱	۳
۱۰/۱۸	۱۰	۹۳/۹۸	۹۵	۱۴/۳۷	۱۳	۳۰	۱/۵	۱۰۰	۲۰	۴
۹	۹	۹۷/۳۶	۹۶/۴۱	۱۵/۱۱	۱۶/۹	۹۰	۰/۵	۵۰	۱۰	۵
۷/۳۷	۷/۴۲	۹۷/۵۳	۹۷/۵	۱۲	۱۰/۵	۹۰	۰/۵	۱۰۰	۱۳	۶
۲۲/۲۵	۲۲	۹۴/۳۲	۹۳/۵	۱۲/۴	۱۰/۵	۹۰	۱/۵	۵۰	۱	۷
۱۵/۵۲	۱۵/۵	۹۸/۹۴	۹۹/۷	۱۶/۳۹	۱۶/۸	۹۰	۱/۵	۱۰۰	۱۸	۸
۱۳/۷۱	۱۴	۹۸/۲۶	۹۹/۷	۱۶/۶۹	۱۵/۸	۶۰	۱	۳۲/۹۶	۱۷	۹
۱۱/۰۳	۱۱	۱۰۱/۳۴	۹۹/۸	۱۲/۲۲	۱۲/۵	۶۰	۱	۱۱۷/۰۴	۷	۱۰
۴/۵۶	۴/۵	۹۶/۳۱	۹۶/۸۱	۴/۸۶	۳/۵	۶۰	۰/۱۶	۷۵	۱۹	۱۱
۱۷/۵۸	۱۷/۹	۹۰/۶	۹۰	۱۳/۲۵	۱۴	۶۰	۱/۸۴	۷۵	۵	۱۲
۵/۰۹	۵/۳	۹۳/۸	۹۳/۰۵	۱۰/۵۲	۹	۹/۵۵	۱	۷۵	۹	۱۳
۱۳/۴۶	۱۳/۵	۹۶/۸۵	۹۷/۵	۱۵/۶۹	۱۶/۶	۱۱۰/۴۵	۱	۷۵	۸	۱۴
۸/۵۵	۷/۲۷	۹۷/۱۹	۹۷/۷۲	۸/۳۳	۷/۴۹	۶۰	۱	۷۵	۱۲	۱۵
۸/۵۵	۸/۵	۹۷/۱۹	۹۷/۷۷	۸/۳۳	۹/۱۵	۶۰	۱	۷۵	۲	۱۶
۸/۵۵	۸/۶	۹۷/۱۹	۹۸	۸/۳۳	۹/۳۶	۶۰	۱	۷۵	۳	۱۷
۸/۵۵	۶/۵	۹۷/۱۹	۹۷/۴۸	۸/۳۳	۸/۲۹	۶۰	۱	۷۵	۱۴	۱۸
۸/۵۵	۱۱/۳۸	۹۷/۱۹	۹۶	۸/۳۳	۹/۲۸	۶۰	۱	۷۵	۴	۱۹
۸/۵۵	۹	۹۷/۱۹	۹۶/۲	۸/۳۳	۶/۵	۶۰	۱	۷۵	۶	۲۰



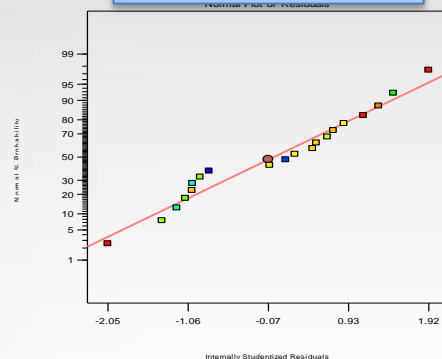
یافته ها

نتایج مربوط به نرمال
بودن داده ها

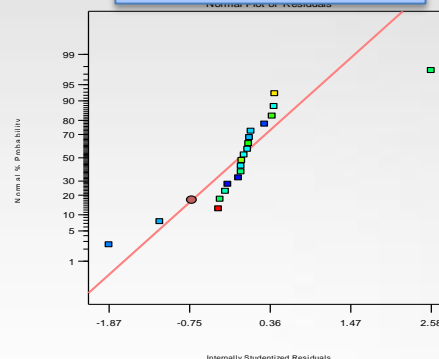
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals

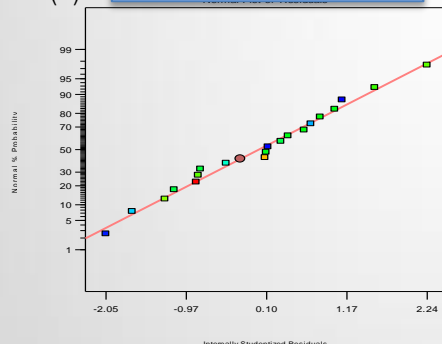


(۳) Normal Plot of Residuals

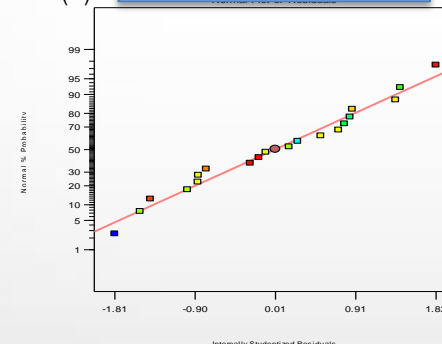


نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش KCl-Cr برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)، جریان معکوس نمک (۳)

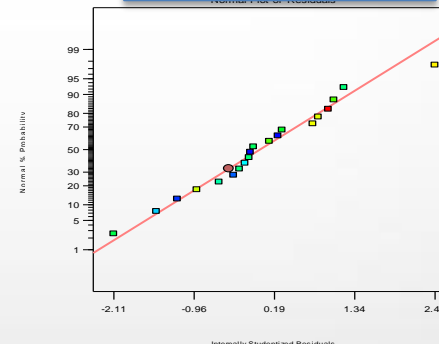
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals



Normal Plot of Residuals



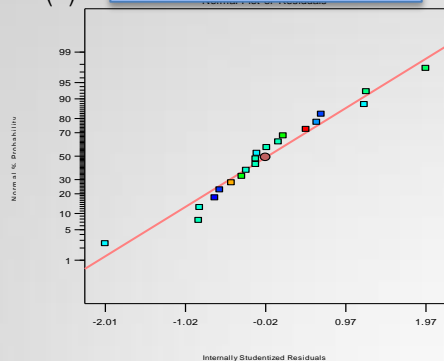
نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش CaCl₂-Cr برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)، جریان معکوس نمک (۳)



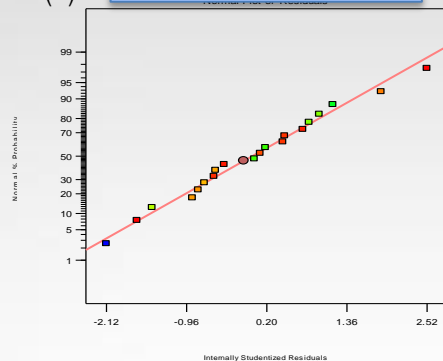
یافته ها

نتایج مربوط به نرمال
بودن داده ها

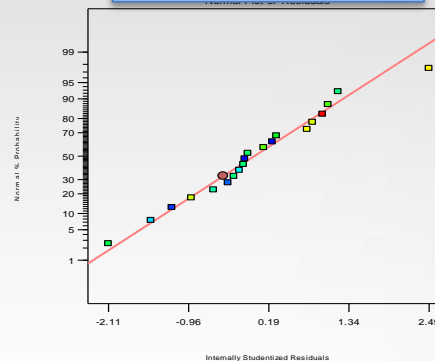
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals

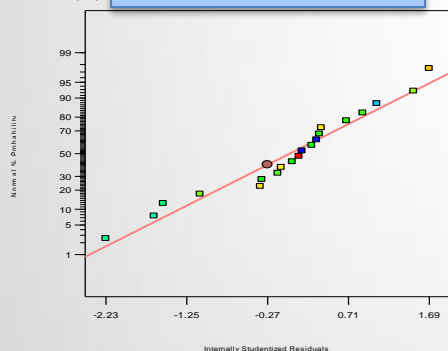


(۳) Normal Plot of Residuals

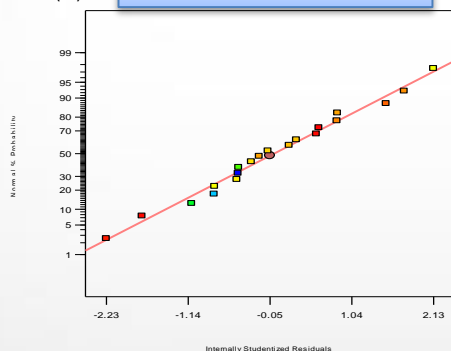


نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش $MgCl_2-Cr$ برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)،
جریان معکوس نمک (۳)

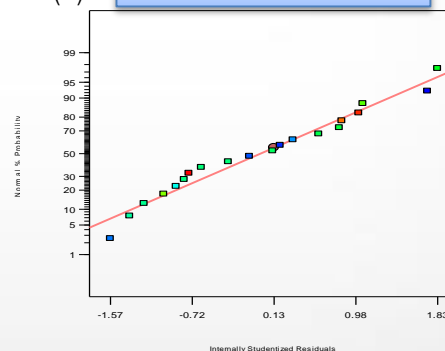
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals



(۳) Normal Plot of Residuals



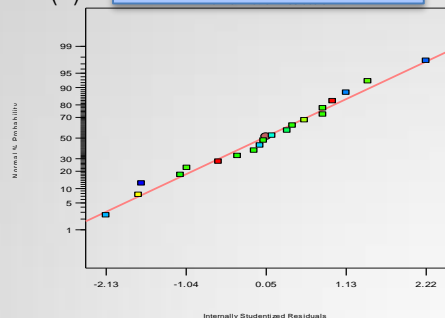
نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش $KCl-Pb$ برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)، جریان
معکوس نمک (۳)



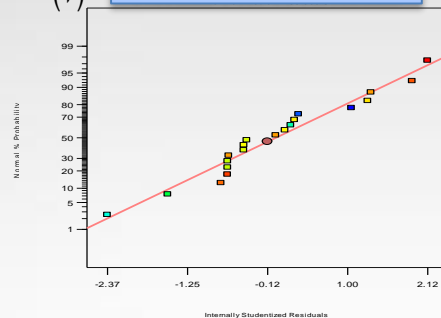
یافته ها

نتایج مربوط به نرمال
بودن داده ها

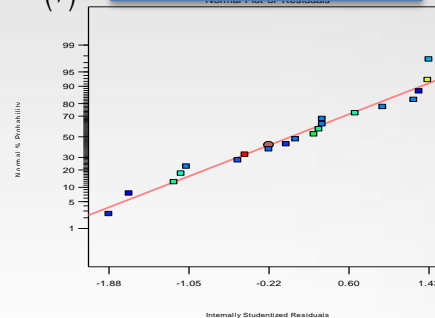
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals

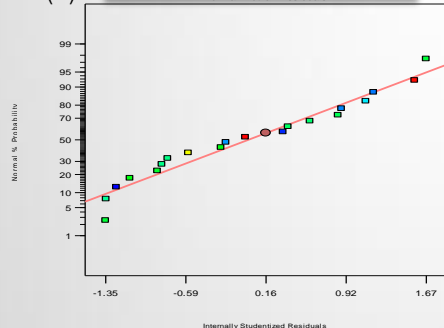


(۳) Normal Plot of Residuals

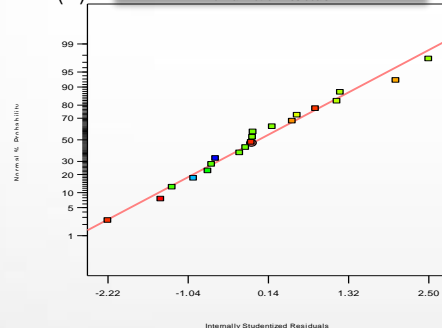


نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش $\text{CaCl}_2\text{-Pb}$ برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)،
جریان معکوس نمک (۳)

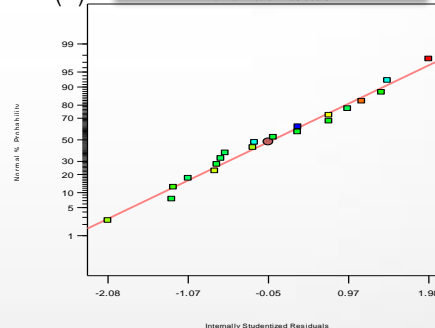
(۱) Normal Plot of Residuals



(۲) Normal Plot of Residuals



(۳) Normal Plot of Residuals



نمودار توزیع احتمال نرمال بودن باقیمانده های آزمایش $\text{MgCl}_2\text{-Pb}$ برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)،
جریان معکوس نمک (۳)



مقدمه

مروری بر منابع

مواد و روش ها

نتایج

بحث و نتیجه
گیری

پیشنهادهات

یافته ها

نتایج آنالیز واریانس حذف
کروم در آزمایش $\text{CaCl}_2\text{-Cr}$
برای فلاکس آب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۲۶/۱۴۶۴	۹	۱۶۲/۷۰	۸۱/۵۶	$< .0001$
A: محلول تغذیه	۷۰/۱۸۲	۱	۱۸۲/۷۰	۹۱/۵۹	$< .0001$
B: محلول کشنده	۷۰/۲۱۸	۱	۷۰/۲۱۸	۱۰۹/۶۴	$< .0001$
C: زمان آزمایش	۷۱/۸۴۶	۱	۸۴۶/۷۱	۴۲۴/۴۸	$< .0001$
AB	۲۳/۱۲	۱	۱۲/۲۳	۶/۱۳	$.0326$
AC	۴۵/۱۸	۱	۱۸/۴۵	۹/۳۵	$.0124$
BC	۸۴/۸۰	۱	۸۰/۸۴	۴۰/۵۲	$< .0001$
A ²	۸۵/۲۵	۱	۲۵/۸۵	۱۲/۹۶	$.0048$
B ²	۱۸/۵۲	۱	۵۲/۱۸	۲۶/۱۶	$.0005$
C ²	۸۲/۱۹	۱	۱۹/۸۲	۹/۹۴	$.0103$
Residual	۹۵/۱۹	۱۰			
Lack of Fit	۰۶/۱۰	۵	۲/۰۱	۱/۰۲	$.4923$
Pure Error	۸۸/۹	۵	۱/۹۸		
Cor Total	۲۱/۱۴۸۴	۱۹			
سایر پارامترهای آماری					
PRESS	AP	Pred.R ²	Adj.R ²	R ²	C.V
Mean	SD				
۱۰۳	۳۳/۱۷	$.093$	$.097$	$.099$	$.159$
					۸۸/۹۷
					۱/۴۱



یافته ها

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش KCl-Cr

$$\text{Water flux (LMH)} = 8.33 - 1.33A + 2.49B + 1.54C + 1.78AB \\ + 1.55AC - 2.07BC + 2.17A^2 + 0.26B^2 + 1.69C^2$$

$$\text{Cr removal efficiency (\%)} = 97.19 + 0.91A - 1.70B + 0.91C + 1.11AB + \\ 1.29BC + 0.92A^2 - 1.32B^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 8.55 - 0.80A + 3.87B + 2.49C - 1.27AB - 1.29AC + \\ 1.48BC + 1.35A^2 + 0.89B^2$$

معادله های اصلاح شده
رگرسیونی حاصل از
برازش مدل

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش CaCl₂-Cr

$$\text{Water flux (LMH)} = 9.58 + 0.51A + 1.96B + 3.57C + 1.19AB + 1.82AC \\ + 0.78BC + 0.72A^2 - 0.45C^2$$

$$\text{Cr removal efficiency (\%)} = 90.16 + 4.74A - 10.54B + 4.88C + 3.74 AB - \\ 4.12AC + 3.51BC - 3.75A^2 - 3.08B^2 - 3.94C^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 7.37 + 1.94 A + 4.43 B + 3.60 C - 0.87AB + 1.63AC + \\ 4.13BC + 4.12A^2 + 1.64B^2 + 1.99C^2$$



یافته ها

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش $MgCl_2-Cr$

$$\text{Water flux (LMH)} = 12.14 - 3.65A + 3.4B + 1.76C - 2.29AB - 1.66AC \\ + 2.34BC + 2.13A^2 - 0.564B^2 - 1.13C^2$$

$$\text{Cr removal efficiency (\%)} = 95.59 + 4.74A - 10.54B + 4.88C + 3.74AB - \\ 4.12AC + 3.51BC - 3.75A^2 - 3.08B^2 - 3.94C^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 8.49 + 1.37A + 3.3.68B + 2.03C$$

معادله های اصلاح شده
رگرسیونی حاصل از
برازش مدل

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش $KCl-Pb$

$$\text{Water flux (LMH)} = 13.88 + 0.75A + 2.63B + 1.09C + 0.75AB - 0.82AC - \\ 1.45BC + 0.52A^2 - 0.51B^2$$

$$\text{Pb removal efficiency (\%)} = 97.10 + 1.62A - 0.87B + 1.33C + 1.57AB - \\ 0.86AC + 0.61BC - 1.00A^2 + 0.45B^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 27.08 + 2.84A + 11.83B + 13.31C + 2.35AB - 2.92AC \\ + 6.56BC + 1.42A^2 - 2.00B^2 + 1.44C^2$$



یافته ها

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش $\text{CaCl}_2\text{-Pb}$

$$\text{Water Flux (LMH)} = 11.35 + 0.86A + 1.95B + 5.09C + 0.56AB + 0.73AC + 0.61BC - 0.27A^2 - 0.93B^2 - 0.21C^2$$

$$\text{Pb removal efficiency(\%)} = 97.01 + 2.40A - 0.78B + 1.08C + 0.69AB - 0.74AC - 1.35A^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 0.11 - 0.072A + 0.17B + 0.068C - 0.14AB - 0.086AC + 0.099BC + 0.042A^2 + 0.080B^2 + 0.039C^2$$

معادله های اصلاح شده
رگرسیونی حاصل از
برازش مدل

معادله رگرسیونی مربوط به آزمایش $\text{MgCl}_2\text{-Pb}$

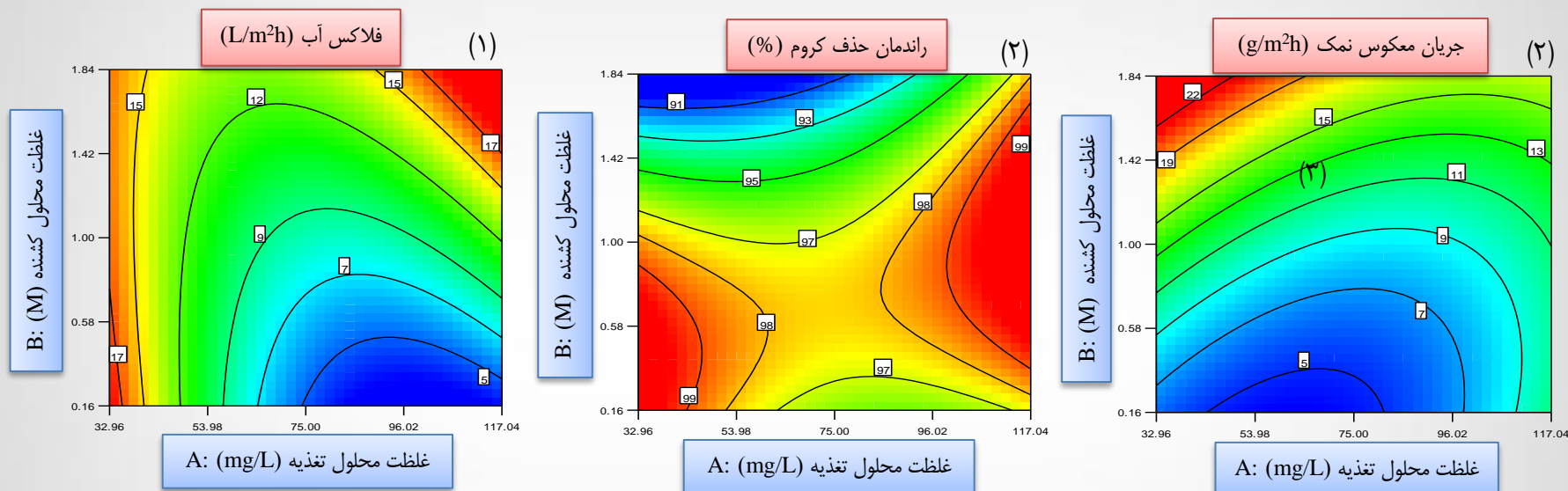
$$\text{Water Flux (LMH)} = 6.81 + 0.39A + 1.35B + 3.29C + 0.64AB + 0.46AC + 0.93BC - 0.45B^2 + 0.42C^2$$

$$\text{Pb removal efficiency (\%)} = 95.43 - 1.14A - 0.31B + 1.60C - 1.20AB + 0.28AC + 0.49BC + 0.63A^2 + 1.33B^2 - 1.31C^2$$

$$\text{RSF (gMH)} = 8.51 + 0.65A + 1.69B - 0.44C + 0.93AB + 1.53AC + 0.49A^2 - 0.84B^2 + 1.35C^2$$



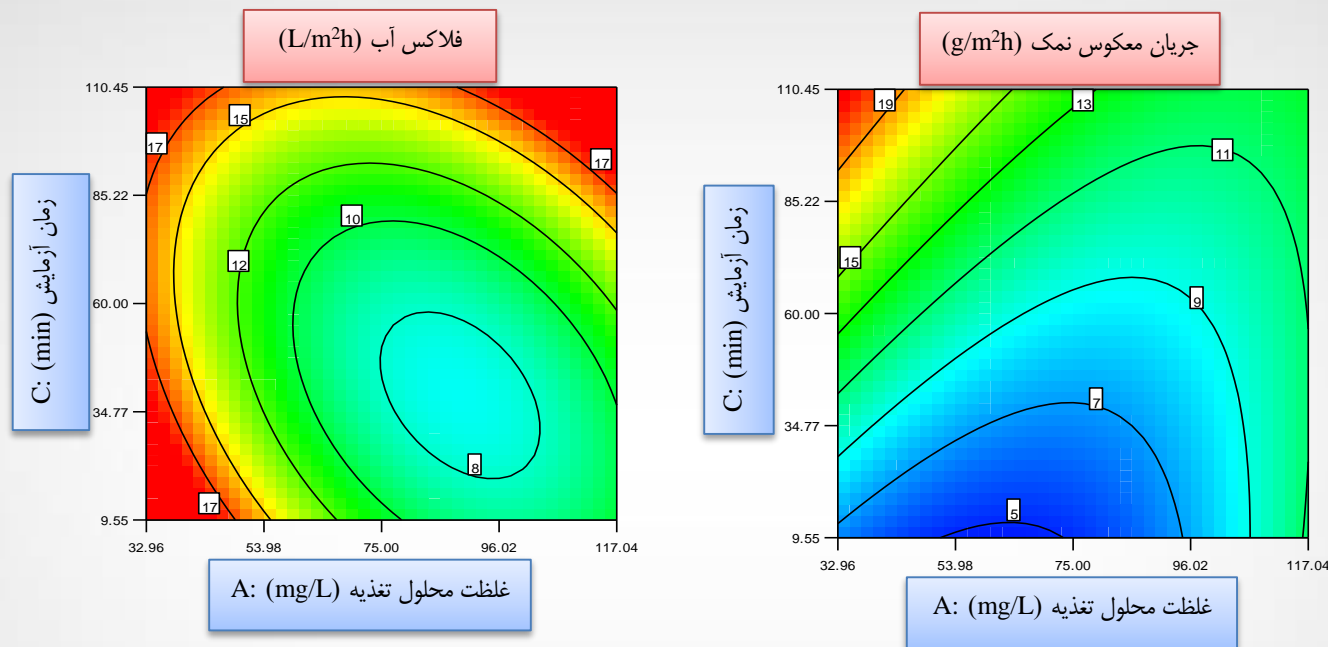
یافته ها



اثرات متقابل محلول کشنده و محلول تغذیه در آزمایش KCl-Cr بر روی فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)، جریان معکوس نمک (۳)

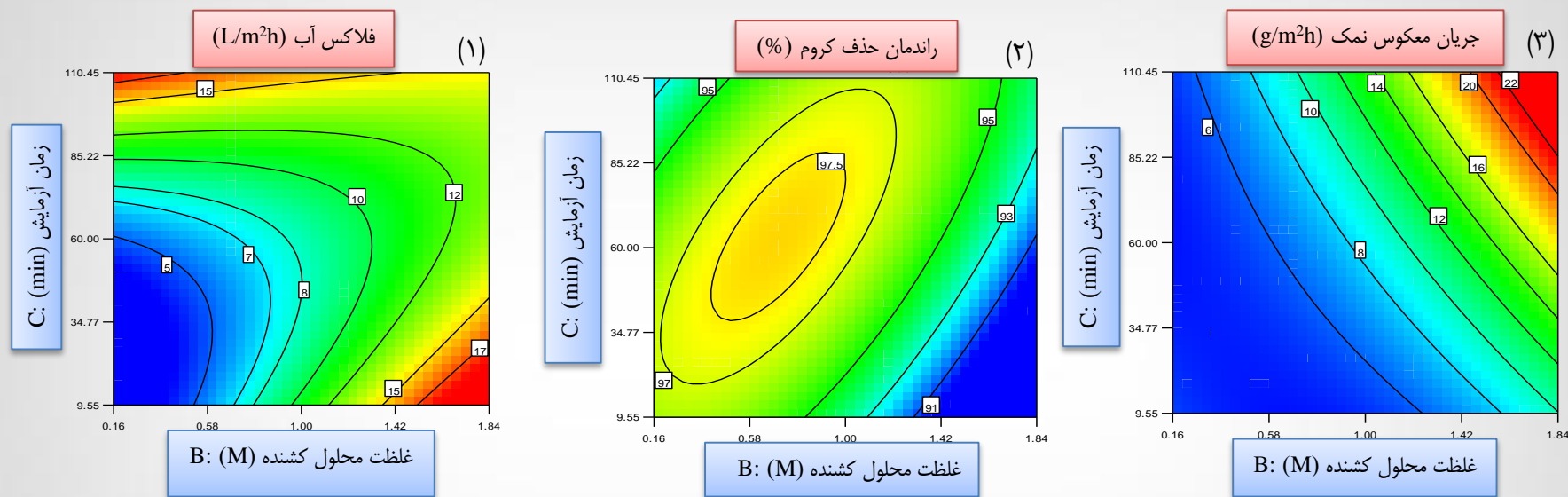
(۱)

یافته ها



اثرات متقابل زمان و محلول تغذیه در آزمایش KCl-Cr بر روی فلاکس آب (۱)، جریان معکوس نمک (۲)

یافته ها



شکل ۹-۴: اثرات متقابل زمان و محلول کشنده در آزمایش KCl-Cr برای فلاکس آب (۱)، حذف کروم (۲)، برگشت معکوس نمک (۳)



یافته ها

نتایج مربوط به بهینه
سازی عددی

بهینه سازی عددی آزمایش KCl-Cr

شرایط بهینه	فلاکس آب (LMH)	حذف کروم (%)	جریان معکوس نمک (gMH)	مطلوبیت (%)
غلظت محلول تغذیه $100 = (\text{mg/L})$ غلظت محلول کشنده $0.93 = (\text{mol/L})$ زمان $90 = (\text{min})$	13/65	99/43	10/03	76

بهینه سازی عددی آزمایش CaCl₂-Cr

شرایط بهینه	فلاکس آب (LMH)	حذف کروم (%)	جریان معکوس نمک (gMH)	مطلوبیت (%)
غلظت محلول تغذیه $62/95 = (\text{mg/L})$ غلظت محلول کشنده $0.76 = (\text{mol/L})$ زمان $90 = (\text{min})$	10/66	97/67	8/33	95

بهینه سازی عددی آزمایش KCl-Pb

شرایط بهینه	فلاکس آب (LMH)	حذف کروم (%)	جریان معکوس نمک (gMH)	مطلوبیت (%)
غلظت محلول تغذیه $50 = (\text{mg/L})$ غلظت محلول کشنده $0.84 = (\text{mol/L})$ زمان $76/24 = (\text{min})$	17/16	94/47	03/7	68



یافته ها

نتایج مربوط به بهینه
سازی عددی

بهینه سازی عددی آزمایش KCl-Pb

مطلوبیت (%)	جریان معکوس نمک (gMH)	حذف سرب (%)	فلاکس آب (LMH)	شرایط بهینه
۷۸	۲۸/۲	۹۷/۵۸	۱۹/۴۴	غلظت محلول تغذیه = ۱۰۰ (mg/L) غلظت محلول کشنده = ۱/۵ (mol/L) زمان = ۳۰ (min)

بهینه سازی عددی آزمایش CaCl₂-Pb

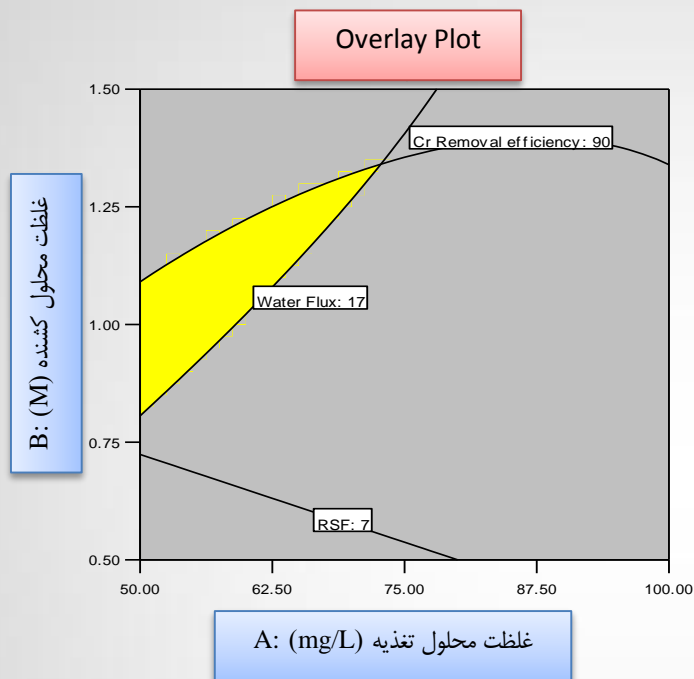
مطلوبیت (%)	جریان معکوس نمک (gMH)	حذف سرب (%)	فلاکس آب (LMH)	شرایط بهینه
۸۸	۰/۱	۹۸/۲۵	۱۷/۵۹	غلظت محلول تغذیه = ۱۰۰ (mg/L) غلظت محلول کشنده = ۱/۰۱ (mol/L) زمان = ۹۰ (min)

بهینه سازی عددی آزمایش MgCl₂-Pb

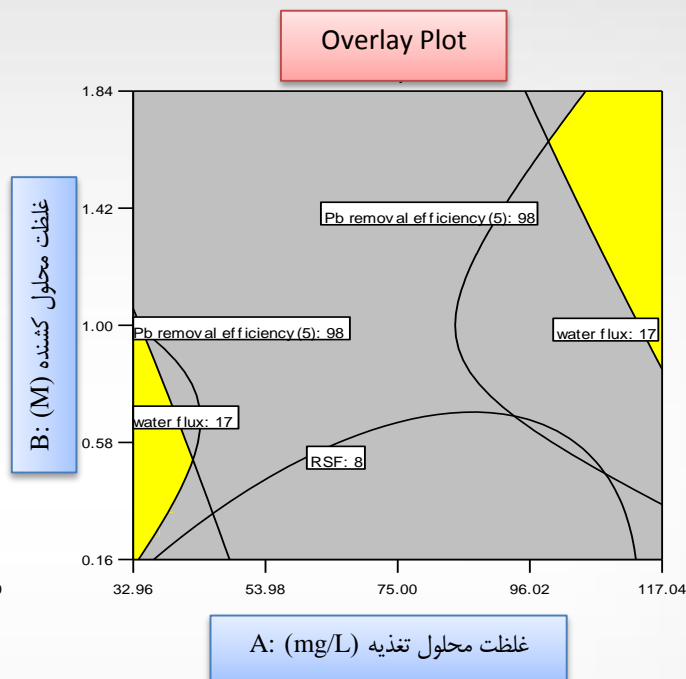
مطلوبیت (%)	برگشت معکوس نمک (gMH)	حذف سرب (%)	فلاکس آب (LMH)	شرایط بهینه
۷۷	۷/۷۶	۹۹/۹۱	۱۱/۰۳	غلظت محلول تغذیه = ۵۰ (mg/L) غلظت محلول کشنده = ۱/۵ (mol/L) زمان = ۹۰ (min)



یافته ها



شکل ۴-۲۶: نمودار روی هم
گذاری شده ناحیه بهینه
آزمایش $MgCl_2$ -Cr



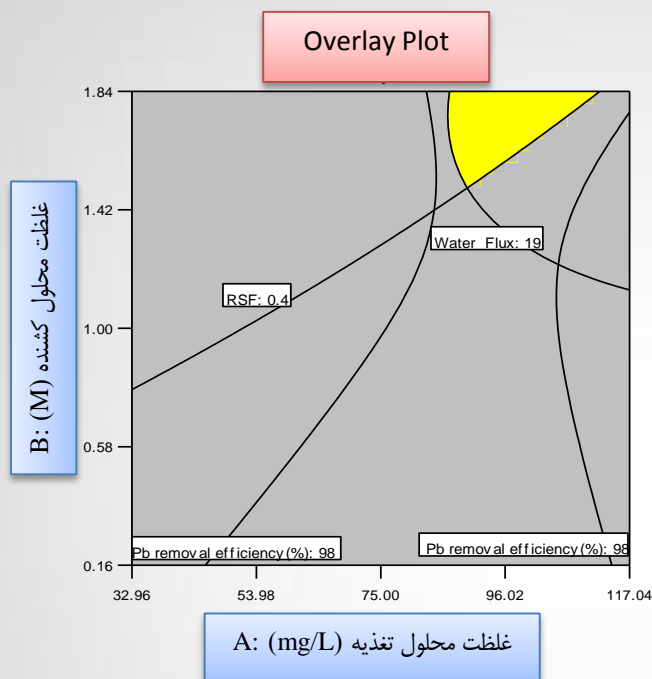
شکل ۴-۲۵: نمودار روی هم
گذاری شده ناحیه بهینه
آزمایش KCl-Cr

نتایج مربوط به نمودار
روی هم گذاری شده
ناحیه بهینه

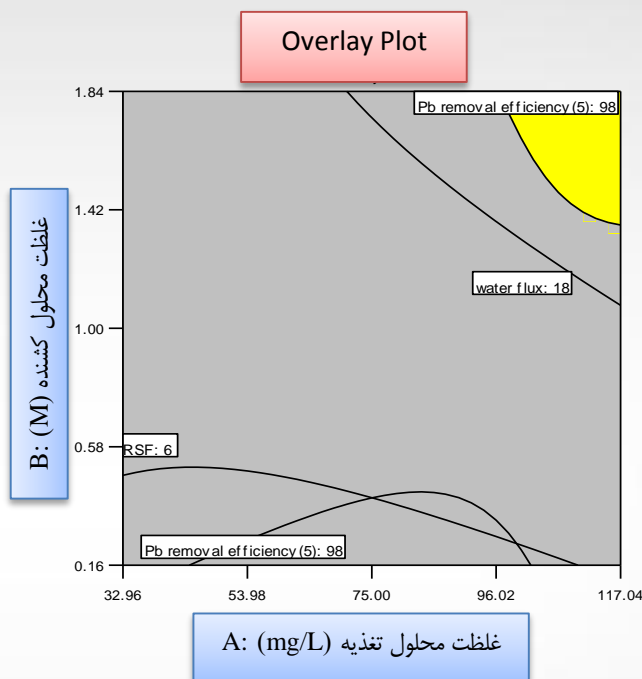


یافته ها

نتایج مربوط به نمودار
روی هم گذاری شده
ناحیه بهینه



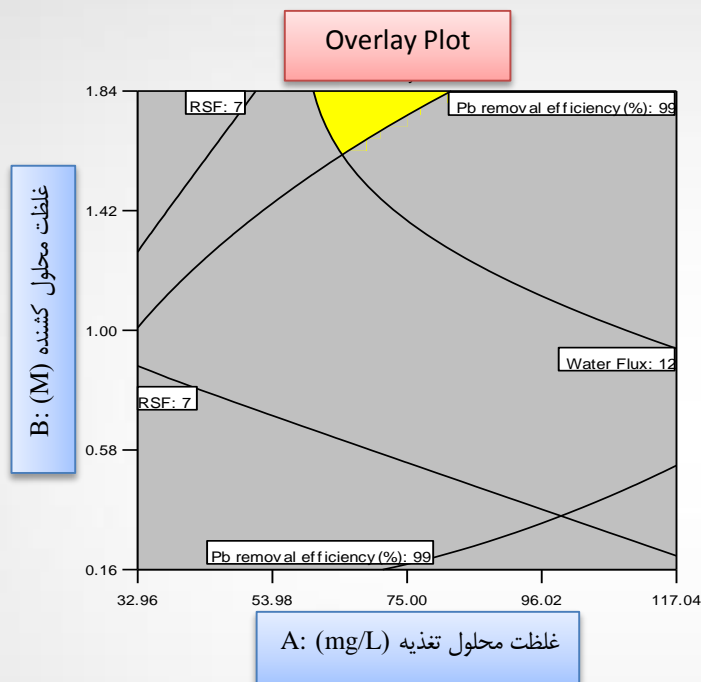
شکل ۴-۲۸: نمودار روی هم
گذاری شده ناحیه بهینه
آزمایش $\text{CaCl}_2\text{-Pb}$



شکل ۴-۲۷: نمودار روی هم
گذاری شده ناحیه بهینه
آزمایش KCl-Pb

یافته ها

نتایج مربوط به نمودار
روی هم گذاری شده
ناحیه بهینه



شکل ۴-۲۹: نمودار روی هم
گذاری شده ناحیه بهینه آزمایش
MgCl₂-Pb



بحث

□ به کارگیری نمک KCl به عنوان محلول کشنده و **فلز سرب** به عنوان محلول تغذیه در فرآیند FO

➤ الصفار و همکاران نیز در تحقیق خود در مورد حذف کبالت (Co^{2+}) از آب و استفاده از KCl به عنوان محلول کشنده، به این نتیجه دست یافتند که با افزایش زمان آزمایش میزان فلاکس آب کاهش و پس از زمان ۲/۵ ساعت به صورت تقریباً ثابت باقی ماند. همچنین با افزایش غلظت Co^{2+} از 12 mg/L به 150 ، میزان فلاکس آب از $17 \text{ L/m}^2\text{h}$ به 11 کاهش یافت. در نهایت با افزایش زمان آزمایش میزان حذف کبالت از ۹۲ درصد در ۳۰ دقیقه به ۸۶ درصد در زمان ۹۰ دقیقه رسید.

➤ در این مطالعه هنگامی که زمان آزمایش به بالای حدود ۸۰ دقیقه رسید و غلظت FS در محدوده 50 mg/L تا ۹۶ قرار گرفت، راندمان حذف سرب به ۹۸ درصد رسید.

بحث

□ به کارگیری نمک CaCl_2 به عنوان محلول کشنده و **فلز سرب** به عنوان محلول تغذیه در فرآیند FO

➤ غلظت بالای DS و FS نشان دهنده افزایش میزان فلاکس آب بود اما تأثیر DS به مراتب بیشتر از FS مشاهده می شود. این پدیده به علت نقش تعیین کننده غلظت DS در میزان فلاکس و تأمین فشار اسمزی برای عبور جریان از غشاء، اتفاق می افتد.

➤ راندمان حذف سرب در غلظت های پایین محلول کشنده (کمتر از ۵M/۰) و در غلظت های بین ۷۰mg/L تا ۹۸ به مقدار ۹۹ درصد رسید. در حالی که در غلظت پایین FS و غلظت بالا در DS به کمترین میزان رسید.

➤ موندال و همکاران در مطالعه خود با هدف حذف آرسنیک با استفاده از فرآیند FO نیز به نتایج مشابهی در رابطه با کاهش غلظت DS و افزایش راندمان حذف آرسنیک رسیدند.



نتیجه گیری کلی

➤ نتایج فلاکس آب برای آزمایش های مربوط به **کروم** در **شرایط بهینه** نشان می دهد که فلاکس آب در زمان استفاده از نمک $MgCl_2$ به عنوان محلول کشنده بالاترین مقدار ($17/16 L/m^2h$) را داشت و در بین آزمایش های **سرب** بالاترین فلاکس مربوط به نمک KCl به میزان $19/44 L/m^2h$ بود. میزان حذف فلزات کروم و سرب در سیستم FO به جز یک مورد که $94/47$ درصد بود، در سایر آزمایش ها بالای 97 درصد به دست آمد.

➤ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که فرآیند اسمز مستقیم می تواند به طور مؤثری در حذف فلزات کروم و سرب از فاضلاب با راندمان بالا عمل نماید. فرآیند اسمز مستقیم همراه با غشاء جدید آکواپورین و به کارگیری روش سطح پاسخ جهت بهینه سازی آزمایش ها، موجب به دست آمدن راندمان بالا در تصفیه فاضلاب و در عین حال اقتصادی و به صرفه بودن این فرآیند شد.

➤ این مقادیر نشان دهنده عملکرد بالای فرآیند FO در حذف فلزات کروم و سرب می باشد.



محدودیت های پژوهش

(۱) به علت وجود موانعی همچون تحریم کشور، امکان تهیه غشاء از شرکت سازنده به صورت مستقیم وجود نداشت.

(۲) نیاز به سرویس و تعمیر مکرر دستگاه جذب اتمی



پیشنهادهای






- (۱) مقایسه عملکرد غشاء AQP با سایر غشاهای موجود و یا غشاهای ساخته شده جدید برای فرآیند اسمز مستقیم، برای بررسی هر چه بیشتر عملکرد غشاء AQP در حذف فلزات سنگین می تواند موضوع جالبی برای ادامه پژوهش در این زمینه باشد.
- (۲) بررسی عملکرد فرآیند FO در حذف سایر فلزات سنگین خطرناک مانند آرسنیک و جیوه می تواند موضوع دیگری برای تحقیق در این زمینه باشد.
- (۳) شرایط عملیاتی فرآیند FO می تواند به صورت جامع تر و با بررسی متغیرهایی مانند دما و pH در بازه های وسیع تر مورد ارزیابی قرار گیرد.
- (۴) استفاده از نانو ذرات در ساختار لایه نگهدارنده و لایه فعال غشاهای AQP می تواند در بهبود عملکرد غشاء از نظر فلاکس آب و جریان معکوس نمک تأثیر گذار باشد.

- Cui Y, Ge Q, Liu X-Y, Chung T-S. Novel forward osmosis process to effectively remove heavy metal ions. *Journal of Membrane Science*. 2014;467:188-94.
- Mondal P, Hermans N, Tran ATK, Zhang Y, Fang Y, Wang X, et al. Effect of physico-chemical parameters on inorganic arsenic removal from aqueous solution using a forward osmosis membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014;2(3):1309-16.
- Jin X, She Q, Ang X, Tang CY. Removal of boron and arsenic by forward osmosis membrane: influence of membrane orientation and organic fouling. *Journal of membrane science*. 2012;-۳۸۹:۱۸۲
۷
- Yari AR, Nasser S, Mahvi AH, Nabizadeh R, Kalantari RR, Yunesian M. Application of a forward osmosis membrane in removal of chromium from aqueous solutions. *FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN*. 2013;22(8):2319-23.

مقالات پایان نامه

وضعیت مقاله	نام همایش	نام ژورنال	عنوان مقاله
Published	-	Environment Health Engineering and Management Journal (ISI)	Chromium removal and water recycling from electroplating wastewater through direct osmosis: Modeling and optimization by response surface methodology
Revised	-	Chemical Engineering and Management Journal (ISI/ IF: 1.84)	Optimization approach of forward osmosis process using aquaporin membrane in removal of chromium
-	همایش بین المللی بهداشت محیط (زنجان)	-	Optimization of Chromium Removal from Electroplating Industries Wastewater Using Forward Osmosis Process

Chromium removal and water recycling from electroplating wastewater through direct osmosis: Modeling and optimization by response surface methodology

Zohreh Naghdali^{1,2}, Soleyman Sahebi³, Reza Ghanbari^{4,2}, Milad Mousazadeh^{1,2}, Hamzeh Ali Jamali^{4,2*}



تشکر و قدردانی..

مراتب سپاس و قدردانی خویش را از سر صدق و اخلاص به محضر استاد گرانقدر **آقای دکتر حمزه علی جمالی**، که در نهایت سعه صدر و خالصانه همواره با حمایت ها و رهنمودهای ارزشمند و سازنده، اینجانب را در انجام این پایان نامه مورد محبت خویش قرار داده اند، ابراز می دارم.

همچنین از حمایت های ارزنده اساتید عزیز **آقای دکتر رضا قنبری و دکتر سلیمان صاحبی** که در کلیه مراحل تحقیق با راهنمایی و مشاوره های اندیشمندانه خود برای تکمیل و ارتقاء کیفیت این رساله کمک موثری داشتند، نهایت تشکر و قدردانی را به جای آورم.

از خانواده عزیز و گرامی ام که در طول تحصیل همواره سنگ صبور و حامی من بودند و سعی کردند که من دغدغه ای به جز کسب علم و دانش نداشته باشم ممنون و سپاسگزارم و از خداوند بزرگ سلامتی، پیشرفت و بهروزی برایش آرزو مندم.

از کارشناسان محترم دانشکده **خانم ها مهندس زهره موسی خانی و مهندس زینب کریمی** تشکر می کنم.



با سپاس فراوان از توجه شما